

# Estudio de Vibraciones por Interferometría y Corrimiento Doppler

Andrés D. Aguilar, Eneas N. Morel, Tomás A. Ribes, Jorge R. Torga

*Laboratorio de Optoelectrónica y Metrología Aplicada – Facultad Regional Delta*

*Universidad Tecnológica Nacional*

*San Martín 1171, C.P.(2208) Campana Provincia de Buenos Aires – Argentina*

*Tel/Fax: +54-3489420400 (int. 136) - e-mail: [adaquilar@frd.utn.edu.ar](mailto:adaquilar@frd.utn.edu.ar)*

## RESUMEN

Se propone una técnica para caracterización de vibraciones mecánicas utilizando interferometría Doppler con un sistema de detección basado en un fotodiodo rápido. La idea es medir el movimiento de una superficie muestra sometida a una vibración utilizando la señal de interferencia producida por la superposición de la luz reflejada en la superficie mencionada con otra reflejada en un espejo de referencia. En la configuración propuesta la rama de referencia está también en movimiento. El análisis de la señal de intensidad permite evaluar las características de la vibración, en particular en este trabajo se busca obtener frecuencia, amplitud y velocidad del movimiento asociado.

El esquema experimental utilizado es una configuración de interferómetro tipo Michelson en aire, con una fuente láser He-Ne. Este esquema ofrece la ventaja de no tener contacto físico con la muestra y permite realizar mediciones a distancia en un amplio rango de amplitud y frecuencia.

Se muestran resultados obtenidos experimentalmente utilizando como muestra un espejo solidario a un parlante lo que nos permite variar amplitud y frecuencia de la vibración en forma controlada.

En paralelo con el experimento se ha desarrollado un modelo que permite simular las curvas de intensidad de interferencia correspondientes a las vibraciones medidas experimentalmente. Se muestran resultados obtenidos con este modelo.

**Palabras Claves:** *Interferometría, Doppler, Vibraciones.*



## 1. INTRODUCCIÓN

La caracterización de vibraciones mecánicas por interferometría óptica es una técnica poderosa que permite la medición sin contacto, a distancia y con gran resolución. Existen varios trabajos en la literatura que presentan distintas alternativas [1-3].

Una de las configuraciones más utilizadas es la de interferometría por división de amplitud donde se utiliza la superposición de la señal óptica reflejada en la muestra y otra en una referencia [4-5].

En este trabajo proponemos la caracterización de un movimiento vibratorio a través de la detección de la fase de la señal de interferencia [6], cuando ambas ramas del interferómetro se encuentran en movimiento. Para una de las ramas (referencia) este movimiento es controlado y conocido, para la otra (muestra) este movimiento es el que se desea caracterizar.

### 1.1 DISCUSIÓN TEÓRICA

El interferómetro utilizado en este trabajo se describe en la Figura 1 [7].

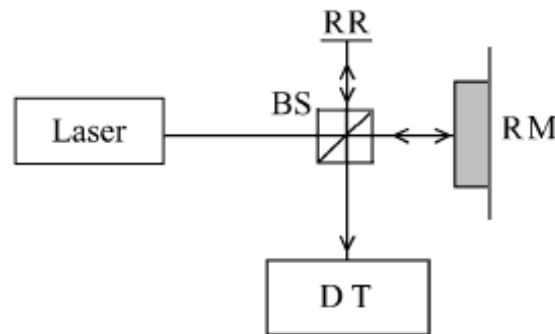


Figura 1 Interferómetro de tipo Michelson.

Donde BS es el divisor de haz, RR es el espejo de la rama de referencia, RM es el espejo de la rama en estudio y DT es el detector.

La intensidad total en el detector, es la superposición de la luz reflejada en la rama de referencia (RR) y en la rama de muestra. La expresión para la intensidad sobre el detector viene dada por [7]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta_{(t)}) \quad (1)$$

Donde  $I_1$  es la intensidad de la rama de referencia,  $I_2$  es la intensidad de la rama muestra y  $\delta$  es la diferencia de fase entre las dos ramas del interferómetro que varía con el tiempo, si la posición de los espejos cambia, de acuerdo a la siguiente relación:

$$\delta_{(t)} = 2k(r_{1(t)} - r_{2(t)}) \quad (2)$$

Donde  $r_1(t)$  es la posición del espejo de la rama de referencia y  $r_2(t)$  es la posición de la muestra tomando como origen el divisor de haz (BS en la figura 1).  $k$  es la frecuencia espacial dada por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

Siendo  $\lambda$  la longitud de onda de la fuente de luz que suponemos monocromática.



## 1.2 DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

En nuestro esquema la fuente de luz utilizada es un laser de He-Ne, centrado en  $\lambda=632$  nm. El espejo de referencia (RR en Figura 1) se montó sobre un posicionador lineal que permite realizar desplazamientos a velocidad constante, de tal manera que se puede suponer la posición  $r_1(t)$  como:

$$r_1(t) = v_1 t + r_{10} \quad (4)$$

Donde  $v_1$  es la velocidad del posicionador y  $r_{10}$  su posición inicial.

En la rama muestra se colocó un parlante con un espejo adosado como se muestra en la Figura 2, que es alimentado por un generador de señales (Agilent 33220). Esto permite desplazar el parlante en un movimiento oscilatorio simple. La idea es utilizar este sistema como muestra de estudio simulando una vibración y pudiendo controlar frecuencia ( $f$ ) y amplitud ( $A$ ). La posición de este espejo está representada por:

$$r_2(t) = A \cdot \cos(2 \pi f t) + r_{20} \quad (5)$$

Donde  $r_{20}$  es la posición inicial que sin pérdida de generalidad podemos tomar igual a  $r_{10}$ .

En la Figura 2 se observa el espejo adherido al parlante (superficie muestra), el haz incidente y la dirección de desplazamiento.

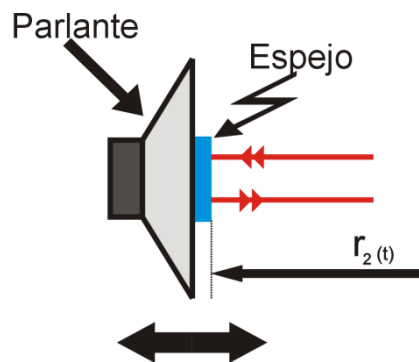


Figura 2 Detalle rama de muestra

Después de la división en BS (Figura 1) cada haz se refleja en el correspondiente espejo y ambas reflexiones generan la señal de interferencia que se detectan en DT. En nuestro esquema el detector es un fotodiodo de silicio (Melles Griot 13DSI007). Dicha señal es digitalizada por un osciloscopio (Tectronik TDS 3052B), almacenada y procesada en una PC.

Llamaremos  $v_2$  a la velocidad del parlante que está dada por la expresión:

$$v_2(t) = \hat{V}_2 \text{sen}(2 \pi f t) = -A 2 \pi f \text{sen}(2 \pi f t) \quad (6)$$

Y definiremos la velocidad relativa  $V_r(t)$  como:

$$V_r(t) = v_1(t) - v_2(t) \quad (7)$$

## 2. SIMULACIÓN

El método utilizado para caracterizar vibraciones se basa en la medición del cambio de fase en la señal de interferencia con el tiempo. Para los resultados que se muestran en este trabajo se midieron los intervalos de tiempo en el que la fase cambia en  $\pi$ , al que llamaremos  $T/2$ . Este tiempo corresponde a una variación en la distancia relativa igual a  $\frac{1}{4} \lambda_{\text{láser}}$ , que es igual a medio período en una oscilación de la señal de interferencia. A partir de estos datos, se determina la velocidad relativa media durante ese intervalo de acuerdo a la siguiente ecuación:



$$\frac{\lambda_{\text{láser}}/4}{T/2} = V_r \tag{8}$$

Este valor se representa en la Figura 3-a y genera un punto en el gráfico de la Figura 3-b.

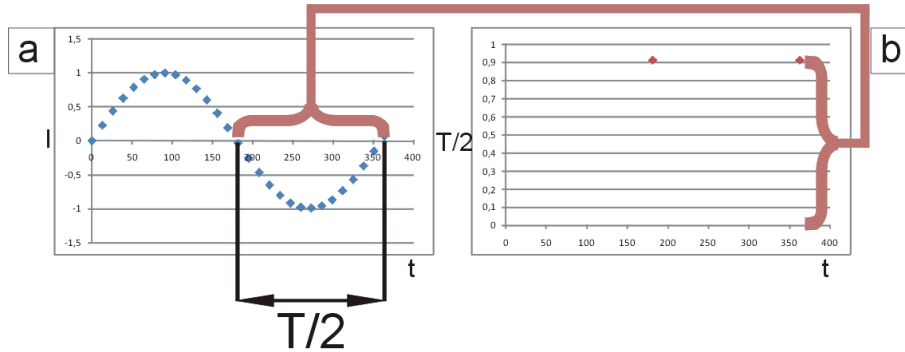


Figura 3 Ejemplo de determinación de  $T/2$  a partir de la señal de interferencia ( $I$ ) en función del tiempo ( $t$ )

En la Figura 4 se puede ver una simulación de los valores de  $V_r$  en función del tiempo para el caso en que el movimiento para cada rama es el propuesto en las Ecuaciones (4) y (5). Para el posicionador lineal se tomó una velocidad constante ( $v_1$ ) de 0.5mm/s, y se consideraron tres valores distintos para la velocidad de pico del parlante ( $\hat{v}_2$ ). En la Figura 4-a se muestra el caso en que  $v_1 = 0.75 \cdot \hat{v}_2$ , en la 4-b  $v_1 = \hat{v}_2$  y en la 4-c  $v_1 = 1.25 \cdot \hat{v}_2$ .

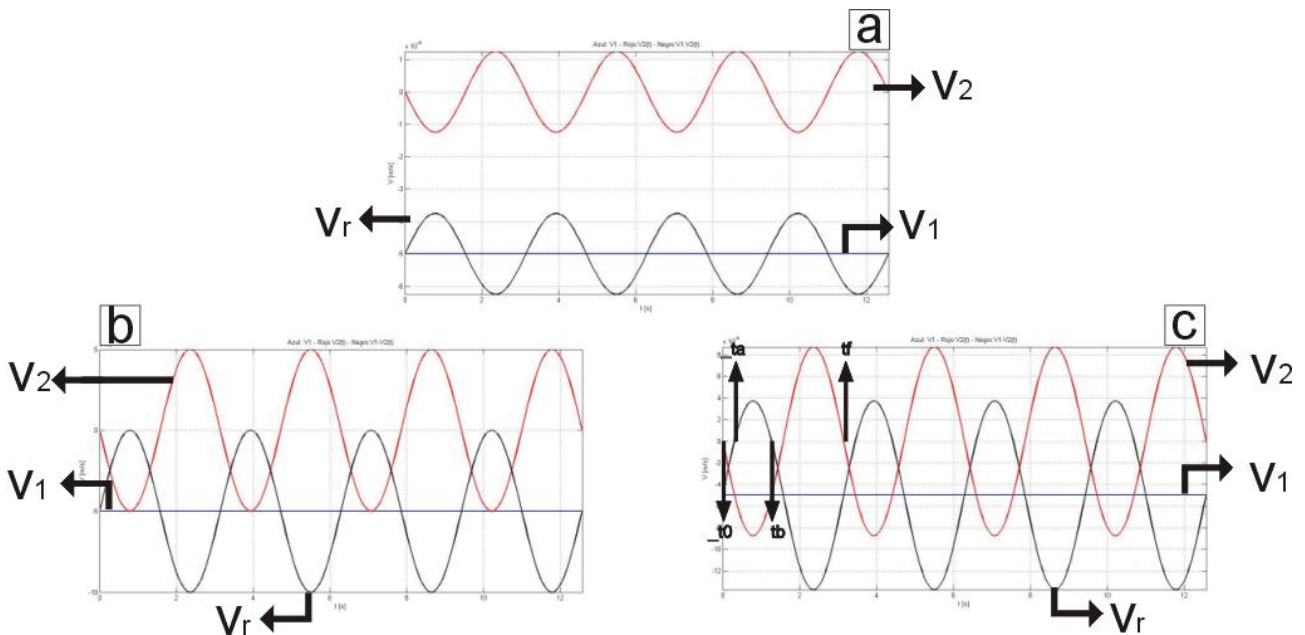


Figura 4 a -  $v_2 < v_1$ ; b -  $v_2 = v_1$  c -  $v_2 > v_1$ .

Estas tres situaciones dan lugar a movimientos relativos con diferentes características. En el primer caso la velocidad relativa nunca llega a valer cero, por lo tanto la distancia relativa entre los espejos es siempre decreciente (el espejo se aleja del divisor de haz) y sin puntos de pendiente nula. En el segundo y tercer caso la velocidad relativa se iguala a cero sólo en ciertos instantes.

En el último caso la velocidad relativa llega a ser cero en dos instantes por ciclo, uno cuando el espejo avanza y otro cuando retrocede. Llamaremos a estos instantes  $t_a$  y  $t_b$  (Figura 4-c).



## 2.1 SEÑALES DE INTERFERENCIA

En la Figura 5 se muestra una simulación de la señal de interferencia en función del tiempo en distintas situaciones que corresponden a los tres casos analizados en el punto anterior. La señal de la Figura 5-a muestra el caso en que el posicionador lineal se mueve a velocidad constante y el parlante esta en reposo. El valor de  $v_1$  es el mismo en todas las figuras. Las Figuras 5-b, 5-d y 5-f muestran el caso en que solo el parlante esta en movimiento y las Figuras 5-c, 5-e y 5-g muestran el caso en que se mueven ambas ramas. Los valores numéricos en la simulación son los mismos que los empleados en la Figura 4.

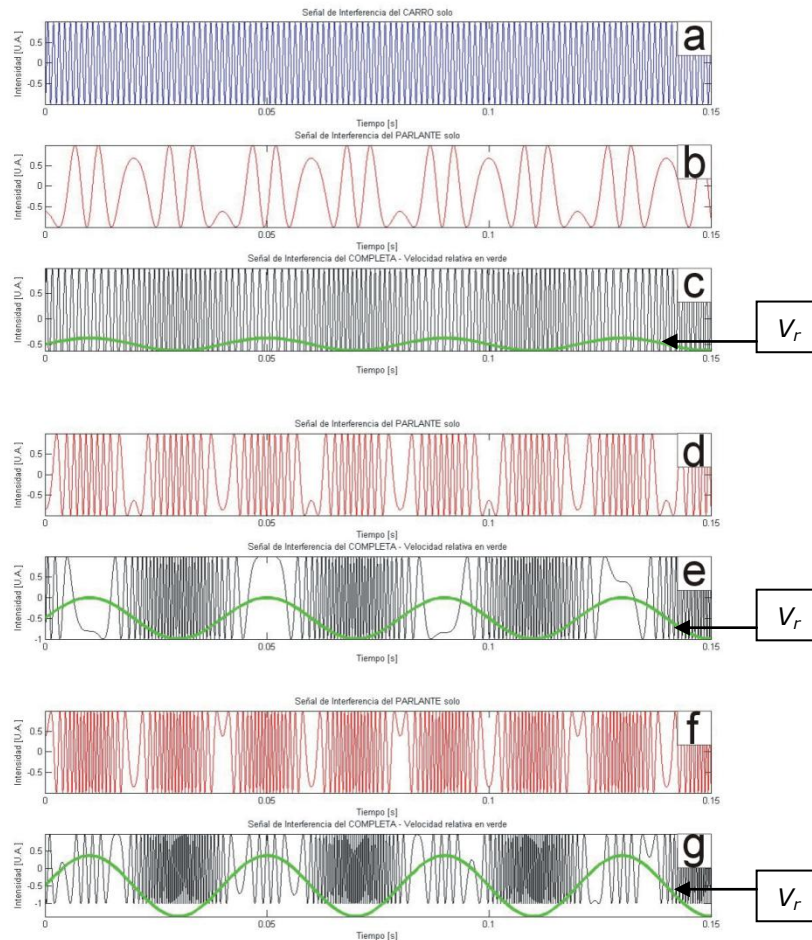


Figura 5 Señales de interferencia en función del tiempo simuladas. En a-solo se mueve el posicionador lineal a velocidad constante  $v_1$ . b, d y f – solo se mueve el parlante. c, e y g – ambas ramas están en movimiento y se obtiene una señal compuesta con corrimiento en frecuencia. Las trazas superpuestas a las figuras c, e y g representan la velocidad relativa  $V_r$ .

En el caso de la Figura 5-c, donde ambas ramas están en movimiento y al que referimos como interferencia completa, se puede apreciar que en los instantes de tiempo donde la velocidad relativa se hace menor en módulo se corresponden con zonas “expandidas” de la señal de interferencia en oposición a zonas de “compresión” del tiempo de duración de las franjas, que se corresponden con velocidades relativas de módulos mayores.



A partir de esta señal se puede obtener una estimación de la velocidad relativa media utilizando el criterio descrito en el punto 2, Ecuación (8), donde se analiza la duración temporal de medio período de la señal de interferencia. Aplicando este análisis a las señales mostradas en la Figura 5 se obtuvieron los siguientes resultados:

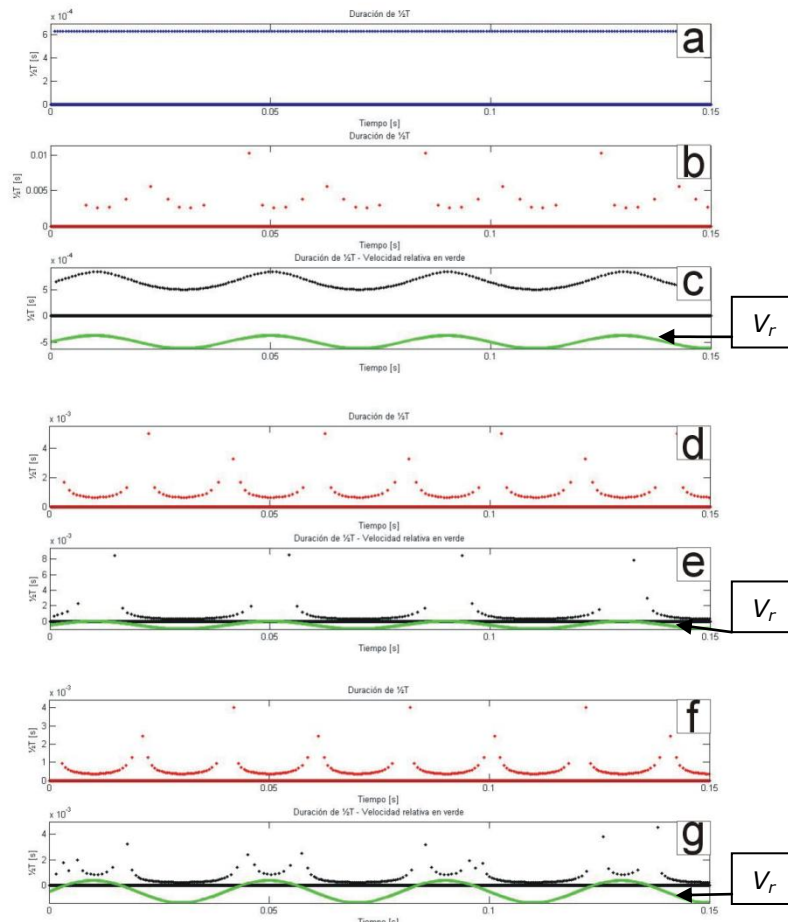


Figura 6 Gráficos de los valores obtenidos para  $T/2$  a partir de las respectivas señales de interferencia simuladas en la Figura 5. (b), (d) y (f) corresponden al movimiento del parlante solo y (c), (e) y (g) a la señal con corrimiento. Las trazas superpuestas a las figuras c, e y g representan la velocidad relativa  $V_r$ .

Los puntos que se muestran en la Figura 6 (b, d, e, y f) sugieren una función tipo  $abs(sec(x))$  o  $abs(cosec(x))$ .

En la Figura 6-g se tienen dos instantes por período en que la velocidad se iguala a cero ( $t_a$  y  $t_b$ ) (indicados en la Figura 4-c). Un intervalo inicial con  $V_r$  negativa ( $t_0:t_a$ ), seguido por otro de  $V_r$  positiva ( $t_a:t_b$ ) y al final del ciclo nuevamente  $V_r$  se hace negativa ( $t_b:t_f$ ).

En la Figura 6-g se muestra que durante el intervalo de velocidad negativa la duración de  $T/2$  disminuye, lo que se condice con módulos de  $v_2$  grandes; mientras que durante el intervalo de velocidad positiva los valores de  $T/2$  aumentan pues el valor absoluto de  $v_2$  disminuye.

En tanto el valor de  $T/2$  diverge en  $t_a$  y  $t_b$ , pues  $\delta$  (Ecuación (1)), tiende a cero.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Haciendo uso del mismo algoritmo para la obtención de los valores de  $T/2$  se analizaron los datos obtenidos en forma experimental en tres situaciones, parlante sin excitar y posicionador en movimiento (Figura 7), parlante oscilando y posicionador quieto (Figura 8) y ambas ramas en movimiento (Figura 9); obteniendo los siguientes resultados:

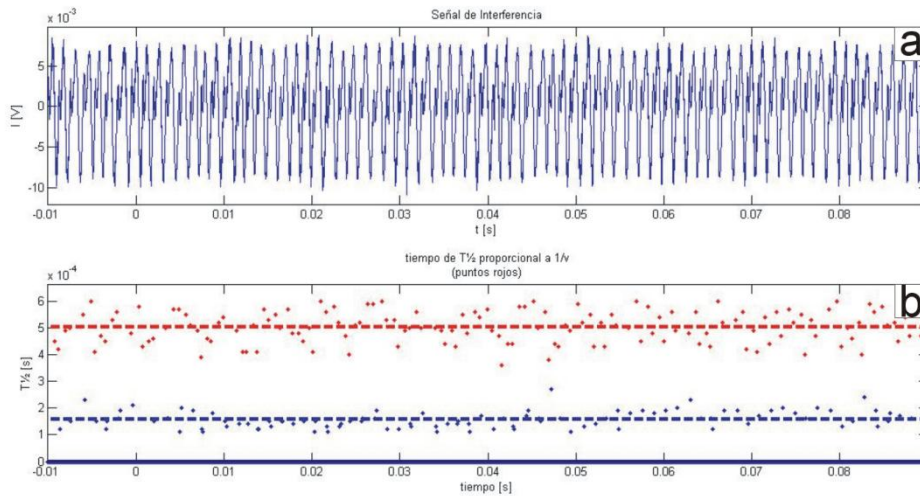


Figura 7 Resultados experimentales con el posicionador alejándose de BS, a velocidad constante y el parlante sin excitar.

En este caso se fija un valor para  $T/2 = 65.91 \mu\text{s}$  ( $v_1 = 0.24\text{mm/s}$ ) con el sistema de control del posicionador. A partir del análisis de la señal que se muestra en la Figura 7-b se obtiene un valor medio  $T/2 = 50.27 \mu\text{s}$  con una dispersión de  $23.99 \mu\text{s}$ .

Se ve también en Figura 7-b una serie de puntos claramente desplazados del valor medio que corresponden a una componente no deseada en el movimiento.

En la Figura 8-b se muestra la señal de interferencia producida por el movimiento del espejo solidario al parlante que hemos idealizado como un movimiento senoidal (Ecuación (5)). Para ello se aplicó una tensión de  $20\text{mVpp} @ 25\text{Hz}$  (Figura 8-a). En la Figura 8-c se muestran los valores obtenidos para  $T/2$ .

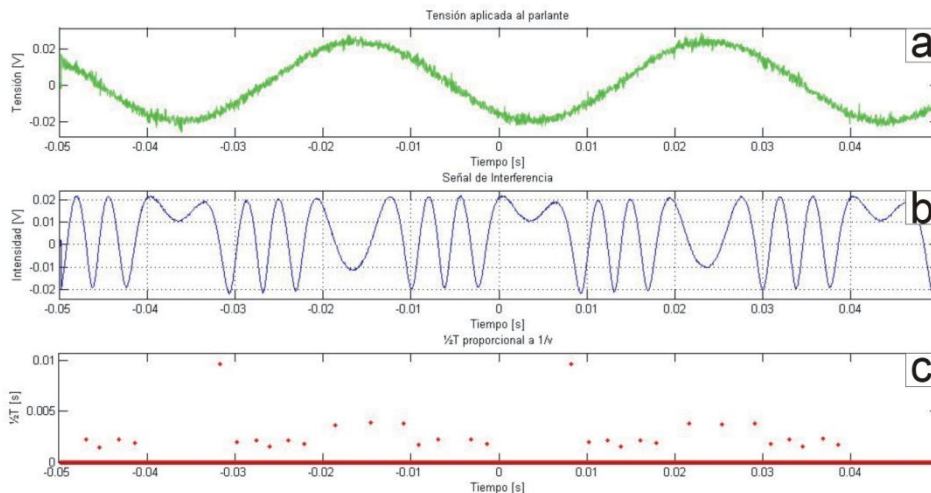


Figura 8 Resultados experimentales con el posicionador estático y el parlante oscilando a 25Hz.

En este caso el movimiento del parlante tiene una amplitud igual a unas pocas longitudes de onda del láser lo que equivale a un valor absoluto en el orden del micrón. En esta situación al tener pocas oscilaciones en la señal de interferencia se dificulta la obtención de las características buscadas: amplitud, frecuencia y velocidad del movimiento. Tampoco es posible discernir el sentido del movimiento, esto es, poder decir en que intervalos de tiempo la muestra se acerca o se aleja del divisor de haz.

En este trabajo se propone utilizar el efecto Doppler producido por el movimiento simultáneo de ambas ramas aumentando la frecuencia de oscilación en la señal de interferencia permitiendo de esta manera



mejorar la resolución y la cantidad de información obtenida para la determinación de los valores mencionados en la caracterización de vibraciones.

Como ejemplo se muestra la curva obtenida cuando la muestra se excita en las mismas condiciones que en el caso anterior pero ahora con ambas ramas en movimiento (Figura 9). En este caso se excitó el parlante a 200mVpp @ 25Hz y simultáneamente se desplazó el posicionador lineal a velocidad constante (siempre en retroceso).

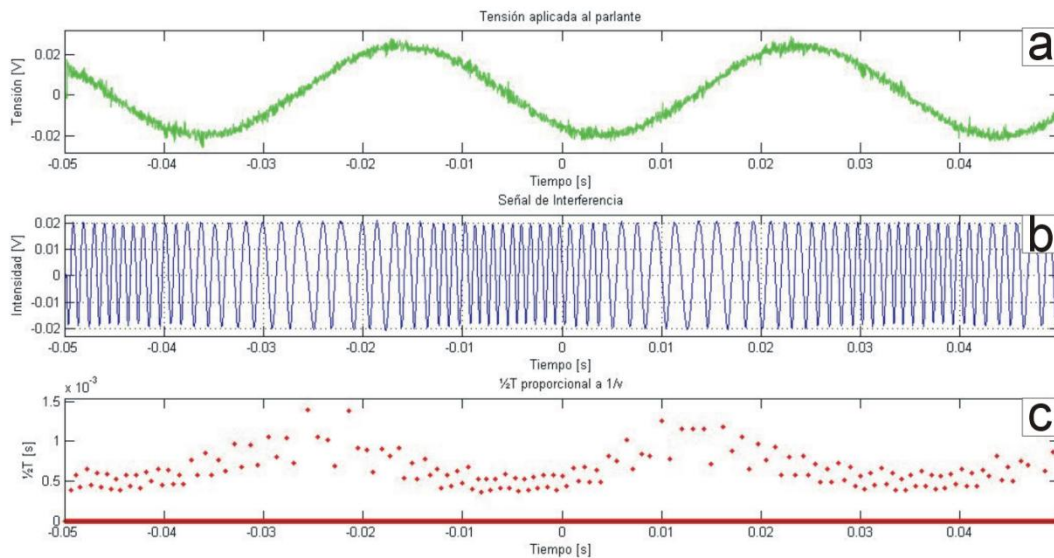


Figura 9 Resultados experimentales con el posicionador estático y el parlante oscilando a 25Hz.

En la Figura 9-b se ven dos regiones bien diferenciadas que corresponden al caso en que el movimiento en ambas ramas tiene el mismo sentido (franja de interferencia “expandidas”) y al caso en el que ambas ramas se mueven en sentido contrario (franja “comprimadas”). De esta manera es posible determinar el sentido del movimiento a partir del gráfico mencionado. Estos resultados se corresponden con la simulación mostrada en la Figura 6-c, donde  $v_1 > v_2$ .

De la comparación entre las Figuras 8 y 9 se ve claramente el efecto de corrimiento en frecuencia con la ventaja mencionada en el estudio de la señal para el análisis del movimiento.

Utilizando la Ecuación (8), se puede calcular la velocidad relativa  $V_r$  correspondiente a los resultados de la Figura 9.

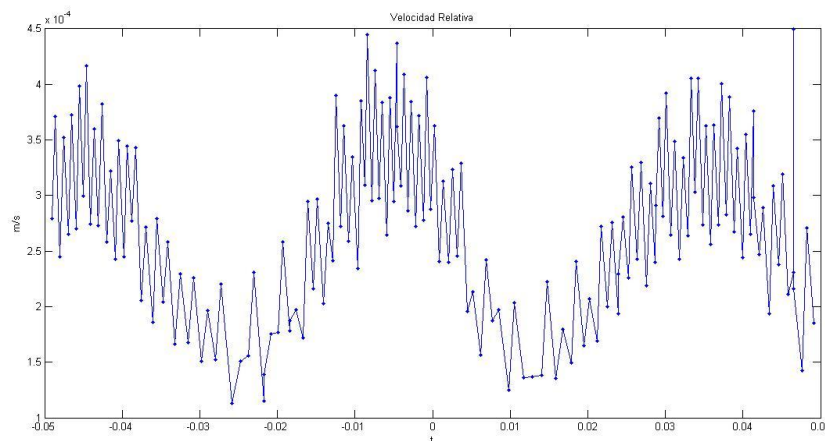


Figura 10 Velocidad relativa  $V_r$  entre las ramas.



**II CAIM 2010**  
**Segundo Congreso Argentino**  
**de Ingeniería Mecánica**  
**San Juan - Noviembre 2010**

#### **4. CONCLUSIÓN.**

Se ha presentado un sistema que propone la caracterización de vibraciones mecánicas utilizando interferometría Doppler en una configuración tipo Michelson con un sistema de detección basada en un fotodiodo rápido. Experimentalmente se simuló la vibración con un espejo adherido a un parlante.

Se han conseguido resultados experimentales con corrimiento Doppler y se mostró su ventaja en la obtención de parámetros de interés en la caracterización del movimiento de la muestra.

En paralelo con el experimento se presentó un modelo que permitió simular las curvas de intensidad correspondientes a vibraciones con amplitud y frecuencia controlada. Los resultados obtenidos con este modelo muestran una clara semejanza con los resultados experimentales por lo que será trabajo a futuro su aplicación en sistemas de vibración de alta frecuencia y amplitud comparables o inferiores a la longitud de onda de la fuente utilizada. Se propone también como trabajo a futuro la optimización del algoritmo utilizado para la obtención de los semiperiodos de oscilación de la curva de interferencia con el objetivo de mejorar la caracterización del movimiento de la muestra.

#### **5. REFERENCIAS**

[1] Robert A. Bruce y Gerald L. Fitzpatrick, "Remote vibration measurement of rough surfaces by laser interferometry", July 1975 / Vol.14, N°. 7 / APPLIED OPTICS

[2] Ahmed Chebbour, Tijani Gharbi, y Gilbert Tribillon, "Laser-diode interferometric heterodyne vibrometer: application to linear motor control", 1 November 2001 / Vol.40, N°. 31 / APPLIED OPTICS.

[3] Akobuije Chijioke y John Lawall, "Laser Doppler vibrometer employing active frequency feedback", 20 September 2008 / Vol.47, N°. 27 / APPLIED OPTICS

[4] Kåre Høgmoen y Ole J. Løkberg, "Detection and measurement of small vibrations using electronic speckle pattern interferometry", July 1997 / Vol.16, N°. 7 / APPLIED OPTICS

[5] Jose A. Ferrari and Pablo gárcia, "Optical.fiber vibration sensor using step interferometry", 1 October 1996 / Vol.35, N°. 28 / APPLIED OPTICS

[6] P. Hariharan. Basics of Interferometry 2ª Edición. *Elsevier Academic Press*, 2007.

[7] Eugene Hecht. Óptica 3ª Edición. Editorial Addison Wesley Iberoamericana, 2000.